

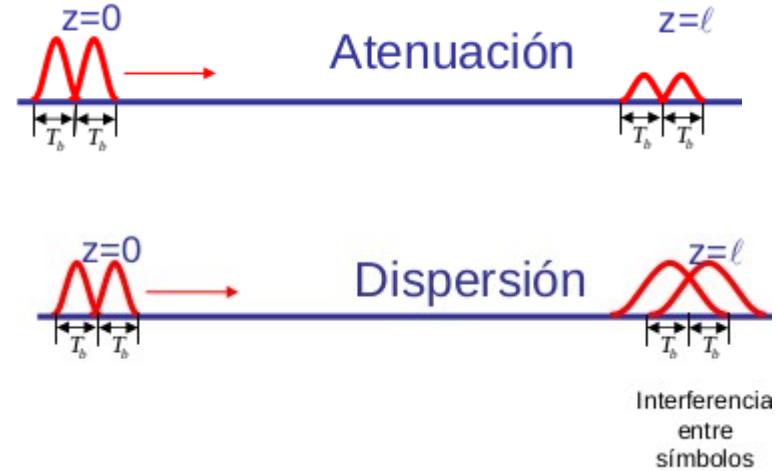
# De la **atenuación** a la **interferencia entre símbolos ISI**

## Modelos de señal

$$r(t) = C s(t) + n(t)$$

$$r(t) = C(t) * s(t) + n(t)$$

## Intuición



## Índice:

1. Modelo de 2 rayos
2. Consecuencias: diagrama de ojos.
3. Fibras ópticas

**Cartagena99**

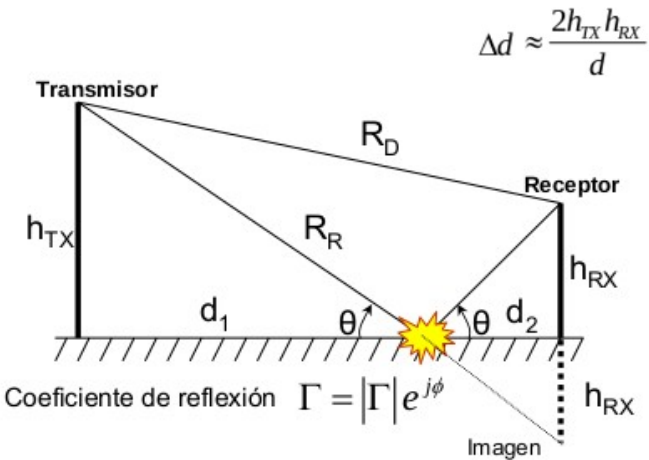
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# ISI: modelos de rayos

## □ Reflexión en Tierra: Modelo de 2-Rayos

- Campo recibido: contribución del rayo directo ( $R_D$ ) y del reflejado ( $R_R$ )



$$E_{RX} = E_{FS} + E_{REFLEJADO} = E_{FS} \left( 1 + \Gamma e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d} \right) \left[ \frac{V}{m} \right]$$

Desfase proporcional a la diferencia de caminos

Perspectiva de fasores:

$$r(t) = x(t) + b x(t - \tau)$$

$\tau \sim \Delta d / c$

si  $x(t) = e^{j2\pi f_c t}$

$$r(t) = e^{j2\pi f_c t} + b e^{j2\pi f_c (t - \tau)} = e^{j2\pi f_c t} (1 + b e^{-j2\pi f_c \tau}) = x(t) H(f)$$

Perspectiva de señal:

$$r(t) = x(t) + b x(t - \tau) = x(t) + b x(t) * \delta(t - \tau) = x(t) * [\delta(t) + b \delta(t - \tau)]$$

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$H(f) = 1 + b e^{-j2\pi f \tau} = 1 + b e^{-j2\pi f \frac{\Delta d}{c}}$  | Modulo y fase!

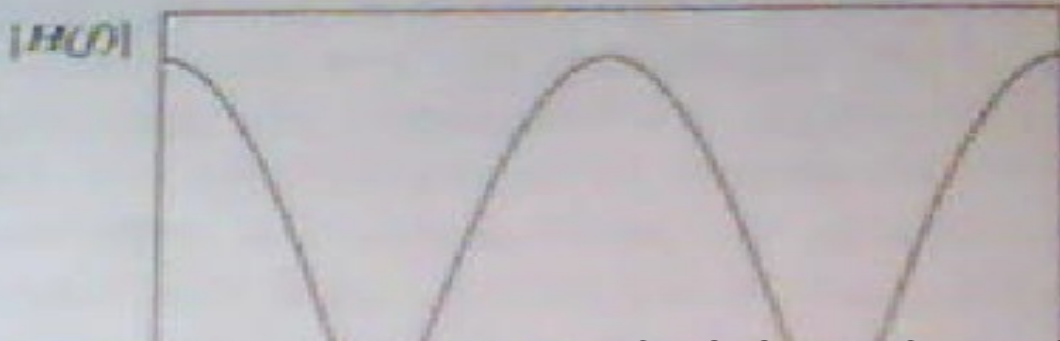
## Modelo de 2 rayos: consecuencias del módulo

$$H(f) = 1 + be^{-j2\pi f\tau}$$



$$\begin{aligned}|H(f)| &= \sqrt{(1 + b \cos 2\pi f\tau)^2 + b^2 \sin^2 2\pi f\tau} \\ &= \sqrt{1 + b^2 + 2b \cos 2\pi f\tau}\end{aligned}$$

Véase la simulación!



$$BW \sim \frac{1}{\tau}$$

1. ¿Qué pasa si  $B_s \ll BW$ ?
2. ¿Qué pasa si  $B_s \sim BW$ ?

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE

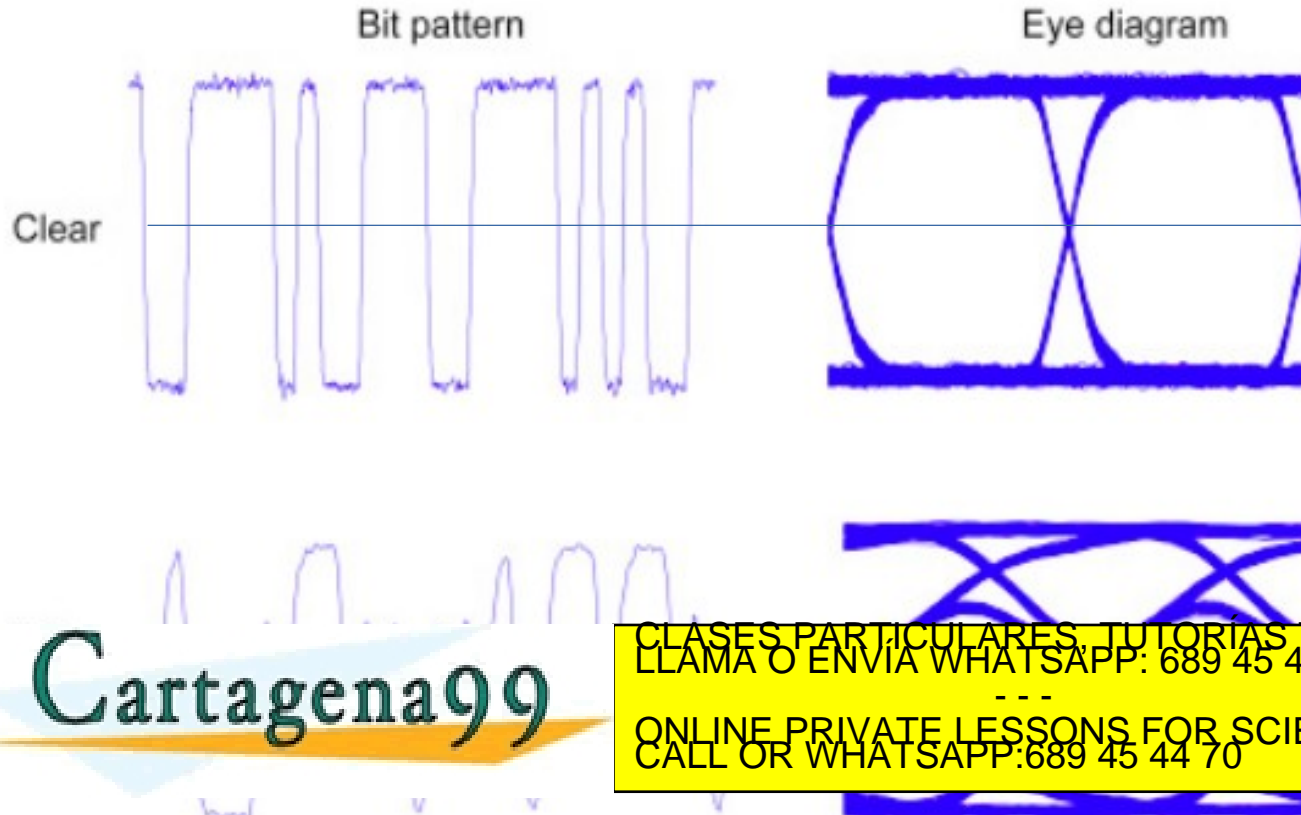
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS

CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

## ISI: diagrama de ojos (~ consecuencias de la fase)

Para pensar en el impacto sobre la  $P_e$ , considere:



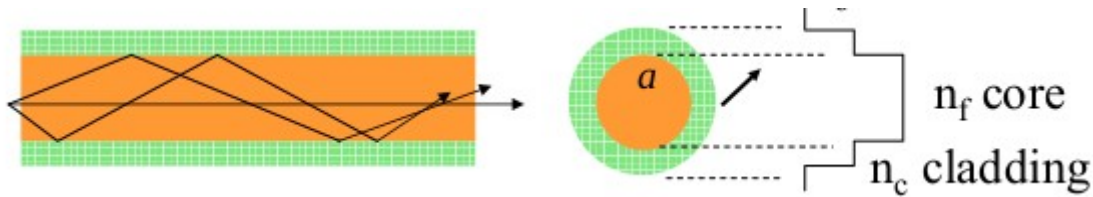
- 1- Muestreo en el centro del ojo
- 2- Presencia de ruido
- 3- Umbral de decisión= 0.

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

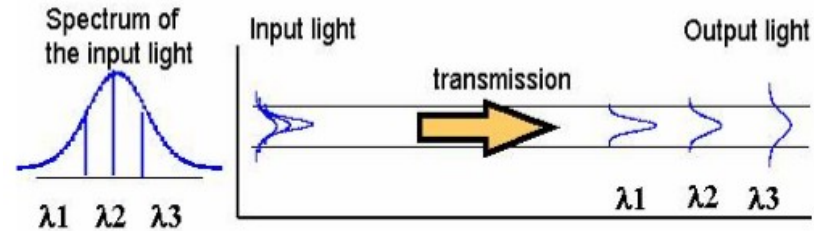
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# Dispersión en fibras ópticas: modelo de rayos



Multimode step-index Fiber

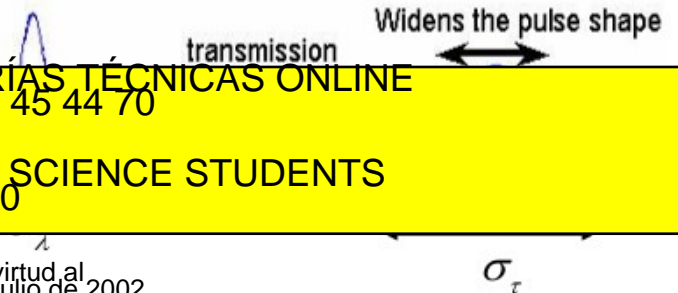
Efecto:



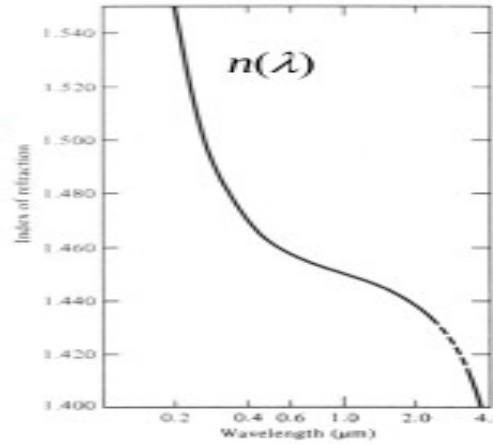
Cuantificación:  $\sigma \equiv \Delta\tau = D_{tot}(\lambda)\sigma_\lambda l$

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Dispersión en fibras ópticas: causas

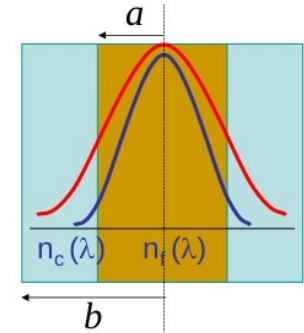


$$\tau_{\text{mat}} = \frac{l}{v_g} = l \frac{d\beta}{d\omega} = l \frac{d}{d\omega} \cdot \frac{\omega n(\lambda)}{c} = \frac{l}{c} \left( n(\lambda) + \omega \frac{dn(\lambda)}{d\omega} \right)$$

- Dispersión del Material
  - Dispersión efecto guíaonda
- } **Dispersión Cromática**

- Dispersión Intermodal: sólo para MMF

$$\frac{l\lambda}{(2\pi a)^2 n_f c} \sigma_\lambda$$



$$\Delta\tau_{\text{mod}} = \frac{l}{c} \frac{n_f}{n} (n_f - n_c)$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

**Cartagena99**

# Dispersión: combinación de diferentes causas

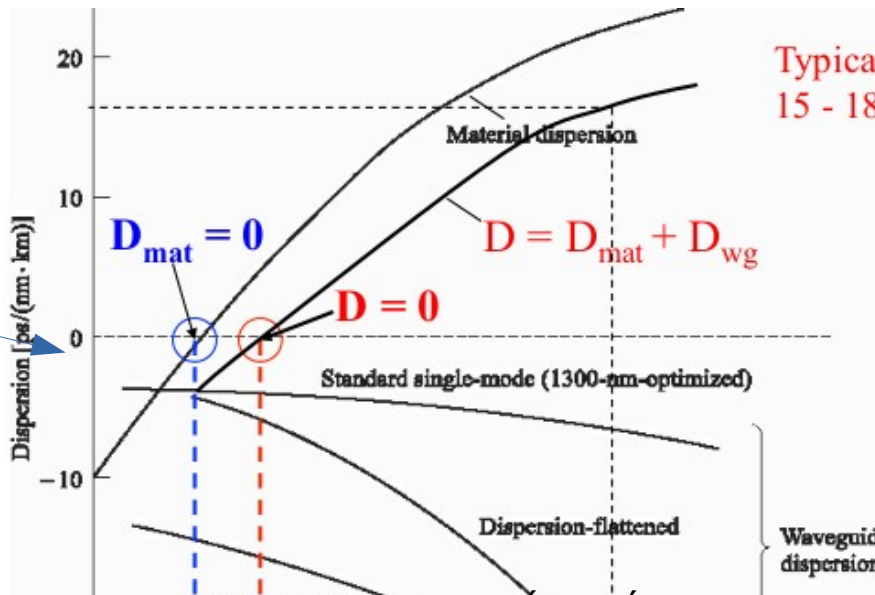
Se considera positiva

Si hay independencia,  
Se suman los cuadrados  
(ej. cromática y modal)

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(\sigma_{mat} + \sigma_{wg})^2 + \Delta\tau_{mod}^2} = D_{tot}(\lambda)\sigma_{\lambda}l$$

Cuidado: si hay dependencia  
puede haber cancelación y  
el signo importa:

$$D_{crom}(\lambda) = D_{mat}(\lambda) + D_{wg}(\lambda)$$



Typical values of D are about  
15 - 18 ps/(km-nm) near 1.55 μm.

- D<sub>wg</sub>(λ) compensate some of the D<sub>mat</sub>(λ) and shifts the λ<sub>ZD</sub> from about 1276 nm to a longer wavelength of ~1310 nm.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

λ<sub>ZD</sub> ≈ 1310 nm (a)

## Discusión de los términos de

$$\text{Cuantificación: } \sigma \equiv \Delta \tau = D_{\text{tot}}(\lambda) \sigma_{\lambda} l$$

1.  $l$  es la longitud del enlace, con unidades típicas de **Kms**.

2  $\sigma_{\lambda}$ , con unidades típicas de **nm** (nano-metros), es la variación de “longitud de onda portadora” ( $\Delta \lambda$ ) debida a la modulación de la señal, por lo tanto, proporcional al ancho de banda de la señal (típicamente se suponen modulaciones binarias).

$$\lambda = c/f \Rightarrow \Delta \lambda = \frac{c}{f^2} \Delta f, \text{ con } \Delta f \geq B$$
$$f = \lambda c \Rightarrow \frac{c}{f^2} = \frac{\lambda^2}{c}$$

$$\sigma_{\lambda} \geq \Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{c} B$$

**Típicamente, el  $\Delta f$  del diodo emisor es mayor que los anchos de banda típicos y**

**podemos considerar  $\sigma_{\lambda}$  constante.**

Por ejemplo:

$B = 2.5 \text{ GHz}$

$\lambda = 1350 \text{ nm}$

$\Rightarrow \sigma_{\lambda} \sim 0.015 \text{ nm.}$

3.  $D(\lambda)$  tiene unidades típicas de ps/ nm-Km, p.ej.  $D = 17 \text{ ps/ nm-Km}$ , fuerza las unidades en el resto de los componentes de la fórmula

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE

LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS

CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



BLP: Producto ancho de banda- longitud

Típicamente, se considera que la distorsión máxima admisible es 25% de Ts

$$\Delta \tau = D \sigma_{\lambda} L = 0.25 T$$

Típicamente, las modulaciones son binarias ( $\eta=1$ )

$$B \sim \frac{1}{T} \text{ y } R = B$$

Por lo tanto:

$$BL = \frac{0.25}{D \sigma_{\lambda}}$$

Por ejemplo:

$$R=B= 2.5 \text{ Gbps}$$

$$D=17 \text{ ps/Km-nm}; \sigma_{\lambda} \geq 0.015 \text{ nm}$$

$$BL \sim 0,98 \text{ Km/ps} * 10^{12} \text{ ps/s} = 980 \text{ Gbps-Km}$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# Efectos de distorsión en la transmisión de datos ( $B \sim R_b$ )

Si la  $\Delta f$  del diodo emisor es mayor que los anchos de banda típicos y podemos considerar  $\sigma_\lambda$  constante.

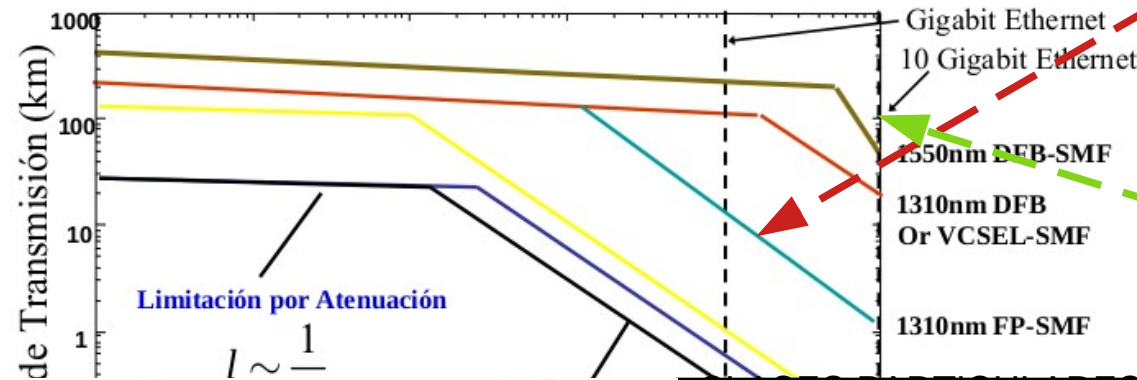
$$BL = BLP \Rightarrow \log(B) + \log(L) = cte \Rightarrow \log(L) = cte - \log(B)$$

Si la  $\Delta f$  del diodo emisor es  $\sim B$  y

$$\sigma_\lambda \sim \frac{\lambda^2}{c} B$$

$$B^2 L = \frac{0.25}{D} \frac{\lambda^2}{c}$$

$$\log(L) = cte - 2 \log(B)$$



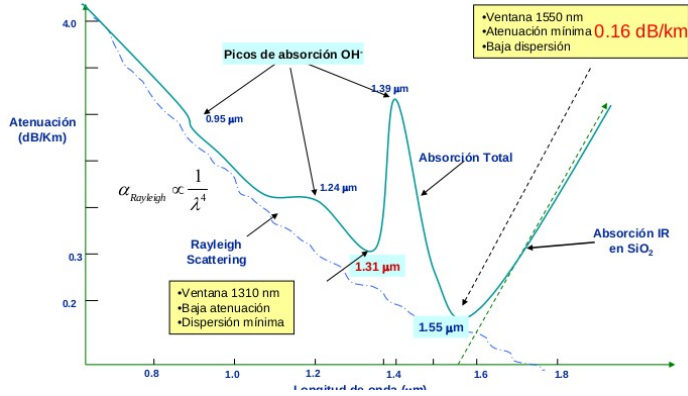
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

# Efectos de la atenuación en la fibra óptica

$$A(\text{dB}) = \alpha (\text{dB/Km}) L(\text{Km})$$



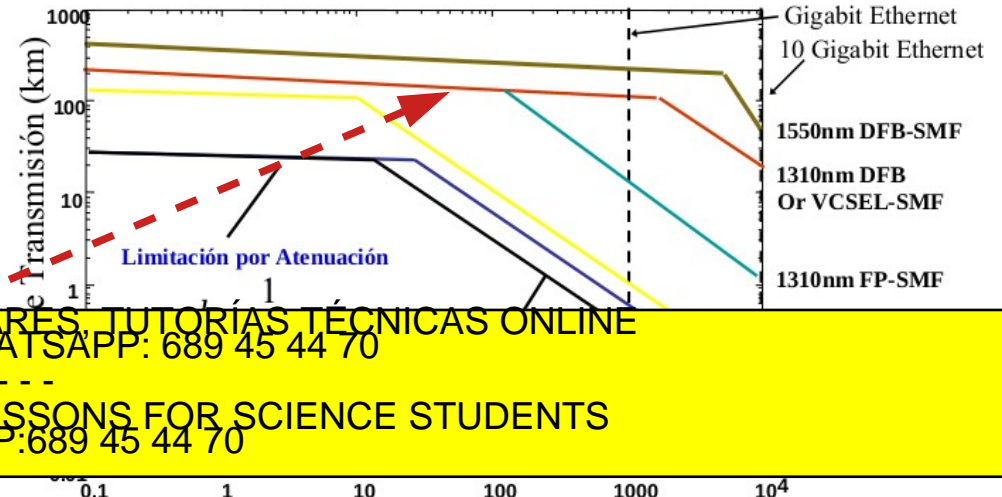
$$S = S_0 + 10 \log\left(\frac{R}{R_0}\right) = Pt - \alpha L$$

$$\alpha L = Pt - S_0 + 10 \log(R_0) - 10 \log(R)$$

Efectos del cambio de R en la sensibilidad:

$$S_B = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10}(kT R_B)$$

$$S = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10}(kT R) = S_B + 10 \log\left(\frac{R}{R_B}\right)$$



**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

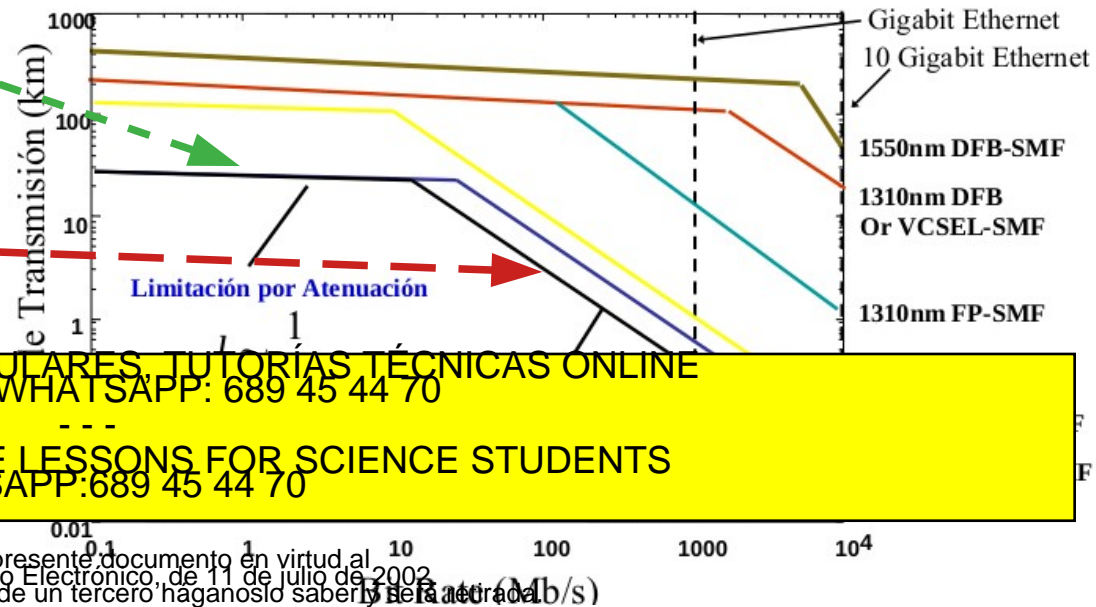
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# Efectos totales en la transmisión de datos (L, R)

Vamos a tratarlos de forma separada  
y nos quedamos con el más restrictivo para la longitud/tasa dadas.

- Atenuación

- ISI



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99